

增强现实系统宽光谱大视场偏振光波导的研制

付秀华 陈志航* 张 静 张于帅 寇 洋

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 分析了两种光学波导结构对光波导视场及其尺寸的影响,并对光波导结构和薄膜进行了优化。通过 TFCalc 软件对波导中的 p 偏振光分光膜进行设计,选择 H_1 和 MgF_2 分别作为高、低折射率材料,并结合 Needle 法和 Variable Metric 法对膜系进行了优化。在 450~600 nm 波段,制备的 p 偏振光分光膜在 25° 入射角下的平均反射率为 30.1%, $50^\circ\sim 80^\circ$ 入射角下的平均反射率小于 5%。该分光膜满足牢固度测试要求。

关键词 薄膜; 光波导; 膜系设计; 大视场; 小型化

中图分类号 O484 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0831001

Study and Fabrication of Polarized Waveguide with Broad Spectrum and Large Field of View in Augmented Reality System

Fu Xiuhua Chen Zhihang Zhang Jing Zhang Yushuai Kou Yang

College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The effects of the two kinds of optical waveguide structures on the field of view and the size of waveguides are analyzed, and the waveguide structure and thin films are optimized. With the TFCalc software, the p polarized beam splitting films in the waveguide are designed. With the choice of H_1 and MgF_2 as the respective high and low refractive index materials and with the combination of the Needle and Variable Metric methods, the film system is optimized. In the wave band of 450~600 nm, the average reflectivity of the p polarized beam splitting films is 30.1% at an incident angle of 25° and is less than 5% at angles of incidence from 50° to 80° . The above film fulfills the requirements for the firmness testing.

Key words thin films; optical waveguide; film system design; large field of view; miniaturization

OCIS codes 310.4165; 130.2755; 300.6550; 290.2745

1 引 言

增强现实作为一种新型显示技术,以其信息集成度高、实时交互性好、便携性等优点在工业、军事等领域得到越来越广泛的应用。增强现实系统是指将计算机生成的虚拟物体或场景叠加到真实场景中,从而实现增强现实的作用。在增强现实的环境中,使用者可以同时看到周围真实环境和计算机产生的增强信息^[1-2]。

在实际应用中,通过微缩显示技术将图像源置于头盔上,可将火控瞄准、飞行状态和战场态势等信息直接投影到飞行员眼前,使得飞行员可随时观察到需要的各种信息^[3]。其中,光学中继系统是衔接图像源和人眼的关键分系统,常见的中继方式有自由曲面棱镜、离轴非球面、光学波导等。国内外学者对各种光学中继系统进行了多方面的研究,2007 年程德文等^[4]对自由曲面棱镜光学结构进行了设计,2012 年卢海平等^[5]利用二元光学技术、非球面技术以及视场拼接技术对头盔光学系统进行了讨论,2015 年吕向博等^[6]采用聚合物材料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚碳酸酯(PC)对头戴显示器光学系统实现了轻量化设计,2014 年曾飞等^[7]对光学波导头盔显示技术进行了理论研究。但是,增强现实系统中宽光谱、大视场、可削弱杂光的光

收稿日期: 2016-03-10; 收到修改稿日期: 2016-04-16

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项(20140203002GX)

作者简介: 付秀华(1963—),女,博士,教授,主要从事光学薄膜、先进光学制造方面的研究。E-mail: goptics@126.com

* 通信联系人。E-mail: czhbetter@126.com

波导的相关研究鲜有报道。

针对增强现实系统对光波导结构大视场、小型化的需求,本文对两种光学波导结构进行了分析,并对光波导所需的宽波段偏振分光膜进行了研制,设计的光波导满足增强现实系统的要求。

2 理论设计

2.1 常见棱镜光波导结构

在增强现实系统中,由棱镜组构成的光波导作为一个集成度很高的导光元件,能将计算机处理后的信息以光束形式导入人眼,克服了由传统光学透镜组成的离轴中继光学系统的视场小、体积大、装调复杂的缺点。

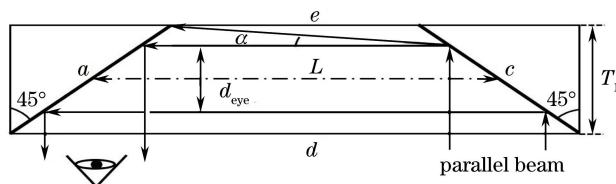


图 1 常见棱镜光波导结构

Fig. 1 Common prism optical waveguide structure

常见的棱镜光波导结构如图 1 所示,它由一个道威(Dove)棱镜和两个直角棱镜胶合而成,界面 a 、 c 与边界 d 的夹角均为 45° ,其上均镀有高反膜。平行光束从道威棱镜的边界 d 一侧垂直入射后,经过界面 a 、 c 的两次反射后进入人眼。其中, T_1 为光波导厚度, d_{eye} 为瞳孔直径, L 为界面 a 与 c 的中心距离(通常为眼轴到同侧头部边缘的距离)。 α 为光束的最大离轴角,受 T_1 、 d_{eye} 、 L 共同制约,由几何关系可得

$$\alpha = \arctan\left(\frac{T_1 - d_{eye}}{2L}\right), \quad (1)$$

当离轴角大于 α 时,光束就会反射到边界 e 上,并在波导内无序反射形成杂光。因此,为避免产生杂光,结合折射定理,受最大离轴角 α 的限制,该结构光波导最大视场为

$$F_v = 2n\alpha, \quad (2)$$

式中 n 为基底折射率,并可得到光波导厚度与视场的关系为

$$T_1 = 2L \cdot \tan\left(\frac{F_v}{2n}\right) + d_{eye}. \quad (3)$$

这类棱镜光波导的缺点如下。

1) 光波导厚度较大。通常,瞳孔直径为 4 mm, L 为 60 mm,当视场分别为 10° 、 20° 、 30° 时,光波导厚度分别为 12.9、19.84、26.88 mm,这对需要结构紧凑、重量较轻、佩戴舒适度良好的机载增强现实系统是不利的^[8]。

2) 视场较小。通常入射光束带有一定的发散角,并不是绝对的平行光,当发散角超过最大离轴角时入射光束就会在边界 d 上发生全反射,从而产生杂散光,降低图像的对比度。

2.2 新型棱镜光波导结构

设计的棱镜光波导具有新型结构,它在增大视场的同时大大减小了光波导的厚度,并在胶合界面通过薄膜设计削弱了杂光的影响,结构如图 2 所示。

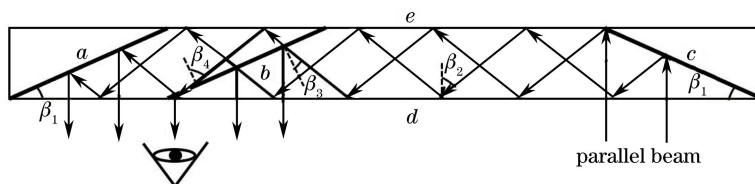


图 2 新型棱镜光波导结构

Fig. 2 New prism optical waveguide structure

图 2 从左到右依次为直角棱镜、菱形棱镜、道威棱镜和直角棱镜,各棱镜的底角均为 β_1 。其中边界 d 、 e 互相平行,界面 a 、 c 镀有高反射膜,界面 b 上镀有特殊的分光膜。平行光束沿垂直于边界 d 的方向入射

棱镜,经过界面 c 反射后在边界面 d 、 e 上发生多次全反射。由光的反射定理和几何关系得到平行光入射角为

$$\beta_2 = 2\beta_1。 \quad (4)$$

选择 K9 玻璃作为棱镜基底材料,平行光在空气-棱镜界面发生全反射,其临界角约为

$$\beta = \arcsin \frac{n_0}{n_1} = 41.14^\circ, \quad (5)$$

式中 n_0 为空气折射率, n_1 为 K9 玻璃折射率。因此,全反射临界条件为: $\beta_2 > 41.14^\circ, \beta_1 > 20.57^\circ$ 。

在分界面 b ,一部分光反射出棱镜,另一部分光穿过界面 b 继续在波导内发生全反射最终由界面 a 反射出波导。在界面 b 入射的光有两种情况,第一种是光束沿边界面 d 、 e 发生奇数次全反射,从界面 b 下方入射,而后反射入人眼,其在界面 b 上的入射角为

$$\beta_3 = \beta_1。 \quad (6)$$

第二种情况是从界面 b 下方透射,沿边界 d 、 e 发生偶数次全反射,最终从界面 b 上方入射,其在界面 b 上的入射角为

$$\beta_4 = 3\beta_1。 \quad (7)$$

由光的反射定理以及道威棱镜底角相等的特性可推得,若光束垂直于边界面 d 一侧入射,则其必从另一侧沿垂直于边界面 d 方向射出。

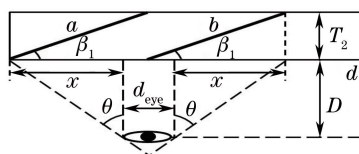


图 3 新型光波导视场计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of calculating field of view of new waveguide

图 3 所示为新型棱镜光波导结构视场的计算示意图,其中 x 为反射界面 a 、 b 在边界 d 上的投影长度, θ 为半视场, T_2 为光波导厚度, D 为出瞳距,该结构的视场大小为

$$F_v = 2\theta = 2\arctan\left(\frac{x}{D}\right) = 2\arctan\left(\frac{T_2 \cot\beta_1 - \frac{d_{eye}}{2}}{D}\right), \quad (8)$$

光波导厚度大小为

$$T_2 = \left[D \tan\left(\frac{F_v}{2}\right) + \frac{d_{eye}}{2} \right] \cdot \tan\beta_1。 \quad (9)$$

显然, β_1 越小,光波导的视场越大,厚度也越小。但是考虑到底角过小棱镜的加工难度较大,且要满足光波导内全反射条件,底角 β_1 最终取 25° 。令出瞳距 D 为 40 mm,瞳孔直径 d_{eye} 为 6 mm,通过计算可得新、旧棱镜光波导结构在不同视场下的厚度,结果见表 1。显然,新型棱镜光波导结构在厚度上有着极大的优势,即在相同厚度下能实现更大的视场,且更有利于小型化。

表 1 不同视场下光波导厚度的对比

Table 1 Comparison of waveguide thickness under different fields of view

Field of view / ($^\circ$)	10	15	20	25	30
T_1 /mm	12.90	16.36	19.84	23.34	26.88
T_2 /mm	3.03	3.85	4.69	5.53	6.40

2.3 杂光的产生与削弱

杂光是由成真实像的光线被光学工作面反射后在像面会聚产生的,通常是正常光线在工作表面经过偶数次反射产生的。对于成像光学系统,杂光会增加像面上的噪声,降低像面的对比度^[9]。在此设计中,杂光主要来自两方面:首先,光束在边界面 d 、 e 上发生偶数次全反射时,其在界面 b 上侧入射,当底角为 25° 时,由(7)式可知此时入射角为 75° 。除透射外,还有一部分光束在界面 b 的上表面发生反射,之后这部分光束在波导内无序的传播,从而形成杂光。通过(6)式和(7)式的对比可以发现,奇数次全反射后在界面 b 上的入射角较小,为 25° ;而偶数次全反射后的入射角较大,为 75° 。因此,如图 4(a)所示,在对界面 b 上的分光膜设计

中,分光膜应尽可能多地削弱大入射角光束的反射,对小入射角光束按一定比例进行分光,从而在扩大视场的同时削弱杂光的影响;其次,当界面 a 和 b 的间距过小时,从界面 a 反射的本应进入人眼的准直光束会抵达界面 b ,并在界面 b 发生反射后在波导内无序传播。而当界面 a 和 b 的间距过大时,在 a, b 之间会产生成像的间隔区。因此,如图 4(b)所示,在设计中应使界面 a, b 在边界面 d 上的投影相互紧邻。

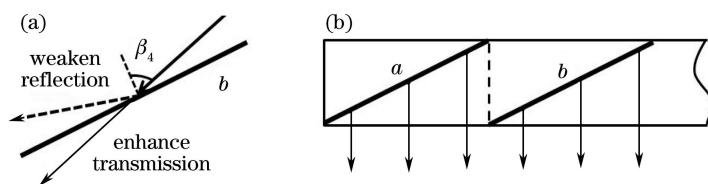


图 4 削弱杂光的两种方法。(a) 使大入射角光束增透;(b) 使界面 a, b 的投影紧邻

Fig. 4 Two methods for suppressing stray light. (a) Transmission enhancement of light with a big angle of incidence; (b) projections of interfaces a and b being close

2.4 分光膜设计

分光膜在界面 b 上对小角度入射光束按反射和透射能量比为 3:7 进行分光;同时,为了削弱杂光,该分光膜应尽可能多地削弱大入射角光束的反射,具体参数见表 2。设计的难点是既要在较大光谱范围内使分光光谱曲线平滑,又要在较大的角度范围内实现较小的反射率。

表 2 分光膜光谱设计参数

Table 2 Spectral design parameters of beam splitting films

Wavelength /nm	Incident angle /($^{\circ}$)	Average reflectivity
450~600	25	$30\% \pm 2\%$
	50~80	$<5\%$

2.4.1 镀膜材料的选择

选择镀膜材料应考虑其在所需波段内的低吸收率、膜层与入射介质、基底折射率的匹配度等问题^[10]。满足要求的高折射率材料有 TiO_2 、 ZnS 和 H_4 等。因充氧量的不同, TiO_2 在蒸镀过程中会生成多种氧化物而导致折射率不稳定^[11]。 ZnS 膜属于软膜且不太稳定,在空气中经紫外线照射后会转变为 ZnO ^[12]。 H_4 的主要成分是 TiO_2 和 La_2O_3 ,含有微量的铜、铁、钴、铬、钒,其透明区为 $0.36 \sim 7 \mu\text{m}$,相对更稳定,而分光膜对材料折射率的稳定性要求较高,因此高折射率材料选用 H_4 。

低折射率材料可选择的有 MgF_2 与 SiO_2 。 SiO_2 吸收率较小,膜层牢固,在 550 nm 处的折射率为 1.46。 MgF_2 是所有低折射率卤化物中最牢固的,成膜坚硬耐久,在 550 nm 处的折射率为 1.38。两种材料折射率差值越大,设计出的膜层厚度就越小,故从折射率匹配角度考虑选择 MgF_2 作为低折射率材料。

2.4.2 膜系设计

当光束倾斜入射时,通常会产生偏振效应,这种偏振效应是电场和磁场在膜层的每一界面上的切向分量均连续的结果。若 n_0, n_j, n_g 分别为入射介质、各个膜层、出射介质的折射率, θ_0 为入射角, θ_j 和 θ_g 分别是膜系和基片中的折射角, η_0, η_j, η_g 分别为入射介质、膜层、基底的有效折射率。对于 p 偏振光,有

$$\eta_0 = n_0 / \cos \theta_0, \quad \eta_j = n_j / \cos \theta_j, \quad \eta_g = n_g / \cos \theta_g. \quad (10)$$

因此,总层数为 $k (k=1, 2, 3, \dots)$ 的多层膜,膜系与基底组合的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_g \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中 δ 为相位, A, B 为矩阵单元,膜系与基底的组合导纳为

$$Y_p = B/A. \quad (12)$$

p 偏振光在膜系中的的反射率为

$$R_p = \left(\frac{\eta_g - Y_p}{\eta_g + Y_p} \right)^2. \quad (13)$$

同理,对于 s 偏振光,入射介质、膜层、基底的有效折射率分别为

$$\eta_0 = n_0 \cos \theta_0, \quad \eta_j = n_j \cos \theta_j, \quad \eta_g = n_g \cos \theta_g. \quad (14)$$

Y_s 为膜系与基底关于 s 偏振光的组合导纳,因此, s 偏振光在膜系中的反射率为

$$R_s = \left(\frac{\eta_g - Y_s}{\eta_g + Y_s} \right)^2, \quad (15)$$

通过(12)~(15)式就可以计算不同偏振光在任意膜系中的反射率。

分光膜系的入射介质和出射介质均为 K9 玻璃,用 G 表示, H 和 L 分别表示 1/4 波长光学厚度的 H_1 和 MgF_2 。通过膜系设计软件 TFCalc 模拟初始膜系 $G|(HL)^4|G$ 在不同入射角下的 p 偏振光和 s 偏振光的反射光谱曲线,如图 5 所示。可以看出, s 偏振光在各层介质中的有效折射率均大于 p 偏振光,因此,在较大的角度范围内难以实现低反射率,出于易于优化角度的考虑,在光波导内只利用 p 偏振光。

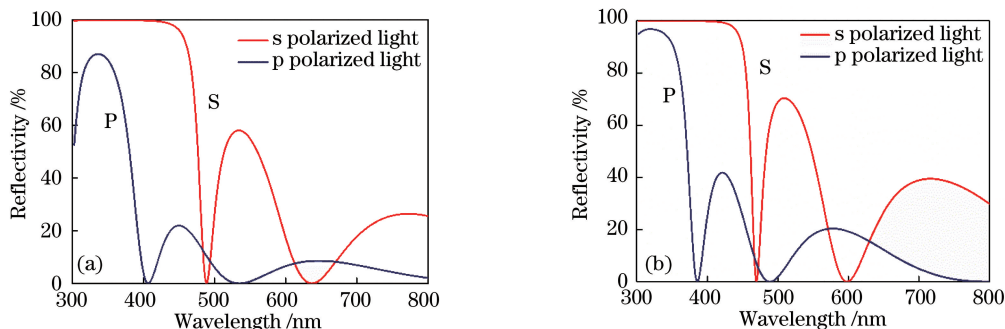


图 5 不同入射角下 p 偏振光和 s 偏振光的反射光谱。(a) 65°; (b) 70°

Fig. 5 Reflectance spectra of p and s polarized light at different angles of incidence. (a) 65°; (b) 70°

首先,考虑到既要对 p 偏振光进行分光,又要在很大的角度范围内使其反射率尽可能低,仅仅通过 8 层薄膜是难以实现的。因此增加初始膜层层数,以 $G|(HL)^7|G$ 为初始膜系,再利用 TFCalc 软件中的 Needle 优化方法对初始膜系进行第一步优化,即通过不断插入薄层来增加变量的维数从而形成一个连续的寻优过程^[13-14]。然而,大入射角的低反射率与小入射角分光曲线的平滑度存在冲突,因此通过定义多个优化目标,并对不同优化目标的容差大小进行折中处理,再利用基于微分算法的变尺度 (Variable Metric) 优化方法对原先膜系进行第二次优化,并删去薄层,可得到最新膜系为 $G|0.36H0.53L0.49H0.85L0.6H0.41L0.67H1.08L0.98H1.19L0.65H|G$,共 11 层,物理厚度为 661 nm, H_1 总厚度为 255 nm, MgF_2 总厚度为 406 nm,理论光谱曲线如图 6~8 所示。由图可知,在 450~600 nm 波段,当入射角分别为 25°, 50°, 60°, 70°, 80° 时, p 偏振光理论平均反射率分别为 29.7%, 0.49%, 2.38%, 4.83%, 4.66%, 满足设计要求。

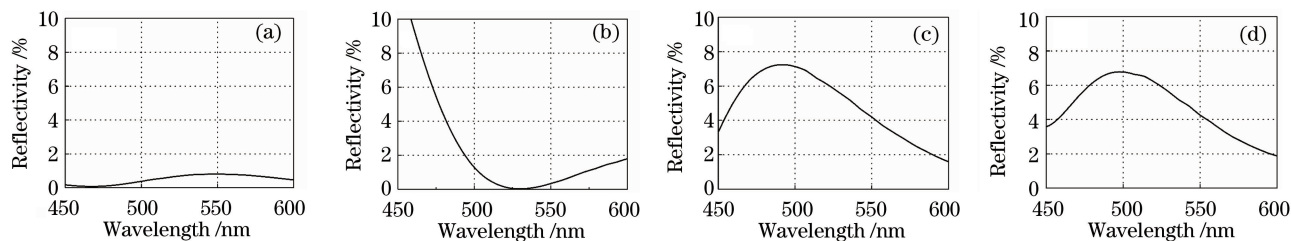


图 6 不同入射角下的理论反射光谱 (p 偏振光)。(a) 50°; (b) 60°; (c) 70°; (d) 80°

Fig. 6 Theoretical reflectance spectra at different angles of incidence (p polarized light). (a) 50°; (b) 60°; (c) 70°; (d) 80°

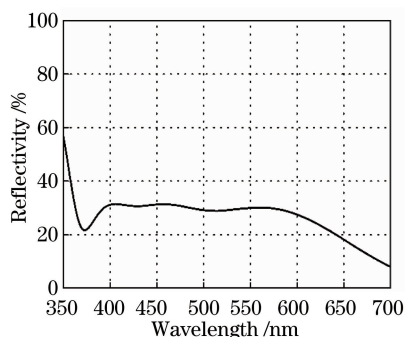


图 7 25°入射角的理论反射光谱(p 偏振光)
Fig. 7 Theoretical reflectance spectrum at an angle of incidence of 25°(p polarized light)

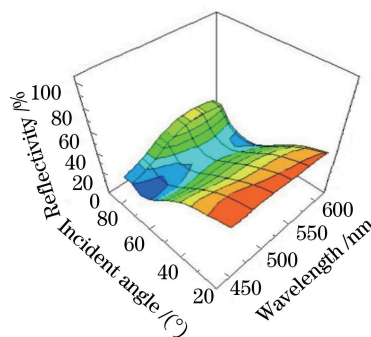


图 8 理论反射光谱曲线(3D图)
Fig. 8 Theoretical reflectance spectral curve (3D)

3 薄膜的制备

偏振分光膜在真空镀膜机(TXX-900 型,奥普康,中国)上制备完成,该设备配备有 IC/5 石英晶体膜厚控制仪、考夫曼离子源和双电子枪。实验采用电子束加热蒸发并在蒸镀过程中结合离子束辅助沉积,以提高膜层致密性。由于在高温下 MgF_2 易氧化,所以离子源气体统一选用氩气(标准状态下)。在镀制 H_4 的过程中单独充入氧气(标准状态下)并保持真空度为 1.5×10^{-2} Pa,以防止 H_4 失氧引起折射率的改变,蒸镀完成后停止充氧,等真空度稳定至 9.0×10^{-3} Pa 后再开始蒸镀 MgF_2 ,具体工艺参数见表 3。

表 3 工艺参数

Table 3 Technological parameters

	Deposition rate /($nm \cdot s^{-1}$)	Substrate temperature /°C	Pressure /Pa	Flow rate of O_2 /($mL \cdot min^{-1}$)	Flow rate of Ar /($mL \cdot min^{-1}$)
H_4	0.3	200	1.5×10^{-2}	22	25
MgF_2	0.8		9.0×10^{-3}	0	25

实验前,将 H_4 和 MgF_2 放入干燥箱中 12 h 进行除湿处理,并用体积比为 1:1 的无水乙醚和无水酒精混合液擦拭基底,镀制前对膜料进行预熔,然后用离子源轰击基底 10 min,离子源参数见表 4。镀制完成后,以 10 °C 为间隔按阶梯式降温至 80 °C 以下后取出基底,防止基底炸裂。

表 4 离子源参数

Table 4 Parameters of ion source

Plate voltage /V	415
Acceleration voltage /V	275
Anode voltage /V	50
Neutral current /A	13~15
Cathodic current /A	15
Ion beam current /mA	50

4 测试结果与分析

4.1 光谱性能测试与分析

用日本岛津生产的 UV-3150 分光光度计对 450~600 nm 波段进行光谱特性测试,得到该偏振分光膜在该波段的反射率曲线,如图 9 所示。

从图 9 可以看出,平均反射率为 28.7%,但是反射率波动较大,最大反射率在波长 450 nm 处,为 32.8%;最小反射率在波长 516 nm 处,为 27.0%,与理论设计的反射率相差较大。通过 TFCalc 软件对膜层敏感度进行分析,如图 10 所示,由图可知第 5 膜层敏感度较高。通过 TFCalc 软件的交互式分析功能对理论设计的膜厚误差进行逆向工程分析^[15],发现当模拟增加第 5 层薄膜厚度时理论曲线与测试曲线拟合程度较高,可

推断测试曲线的反差可能是膜厚控制误差引起的,蒸镀该层薄膜时实际厚度大于理论厚度。而实际上晶控片的灵敏度随着薄膜在其表面沉积质量的增加而降低^[16],因此,再次进行实验,在蒸镀时对第5层厚度采用晶控片进行单独控制,重新得到的测试结果如图11、12所示。

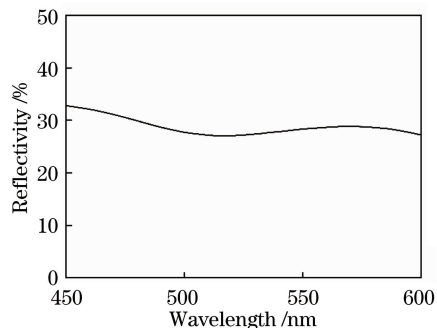


图9 反射光谱测试曲线(p 偏振光)
Fig. 9 Test curve of reflectance spectrum
(p polarized light)

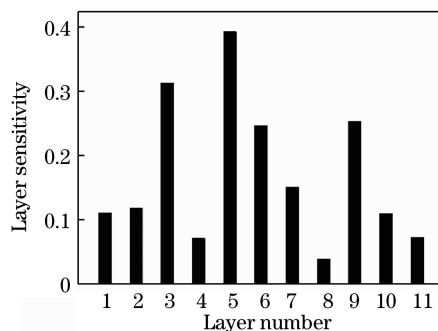


图10 膜层敏感度分析
Fig. 10 Layer sensitivity analysis

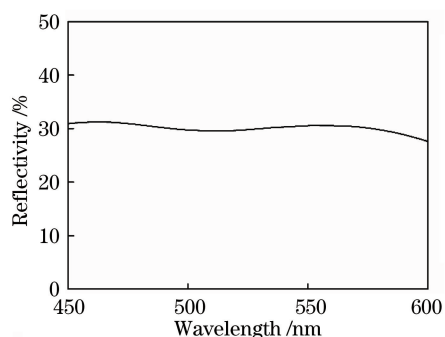


图11 改进工艺后25°入射角反射光谱测试曲线
Fig. 11 Test curve of reflectance spectrum at an incident angle
of 25° after process improvement

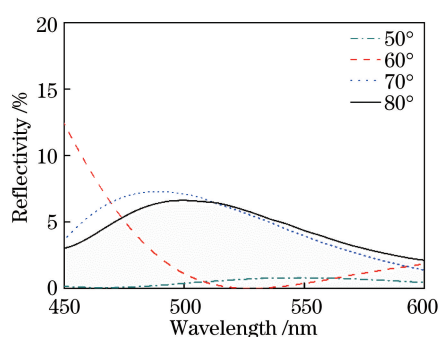


图12 不同入射角下的反射光谱测试曲线
Fig. 12 Test curves of reflectance spectra at
different angles of incidence

由测试结果可知,当入射角为25°时,平均反射率为30.1%,误差小于±1%;当入射角分别为50°,60°,70°,80°时,平均反射率分别为0.68%,2.65%,4.97%,4.88%,满足设计要求。

4.2 牢固度测试

由于膜层胶合在棱镜内部,未暴露在外界环境中,所以只对膜层牢固度进行测试。用粘性强度不小于3 N/cm²的胶带紧贴在膜层表面,然后沿薄膜表面的垂直方向迅速拉起,重复10次,膜层无脱落无损伤。

5 结 论

对增强现实系统中所需的光波导进行研究,将棱镜组光波导结构与薄膜设计相结合。首先,对影响视场角的因素进行了分析,计算出视场角的推导公式,并对两种棱镜组光波导结构进行对比,得出具有更大视场角和更小厚度的新型光波导结构。其次,分析了杂光的产生原因,并从波导结构和薄膜设计两方面就减弱杂光对图像对比度的影响进行了优化设计。最后,利用反射率较低的p偏振光进行初始设计,降低膜系优化难度。选取H₄和MgF₂作为高低折射率材料,并利用TFCalc软件进行设计和分析;分析敏感层厚度对反射率的影响,解决了膜厚控制误差带来的分光膜反射率差值较大的问题,使制备的光波导满足增强现实系统的需要。设计的光波导距离更大视场角、完全消除杂光的要求还有一定差距,所以寻找新材料,进一步增大视场、减少杂光反射是今后的研究方向。

参 考 文 献

1 Ha Yonggang, Zhou Ya, Wang Yongtian, *et al.* Head mounted display for augmented reality visualization[J]. Optical

- Technique, 2000, 26(4): 350-353.
- 哈涌刚, 周 雅, 王涌天, 等. 用于增强现实的头盔显示器的设计[J]. 光学技术, 2000, 26(4): 350-353.
- 2 Nee A Y C, Ong S K, Chrystolouris G, *et al.* Augmented reality applications in design and manufacturing[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012, 61(2): 657-679.
- 3 Wang Hui, Liu Chunhua, WangYongsheng. Comments on helmet-mounted display system[J]. Electronics Optics and Control, 2012, 19(8): 45-49.
- 王辉, 刘春华, 王永生. 头盔显示系统评述[J]. 电光与控制, 2012, 19(8): 45-49.
- 4 Cheng Dewen, Wang Yongtian, Chang Jun, *et al.* Design of a lightweight and wide field-of-view HMD system with free-form-surface prism[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 309-311.
- 程德文, 王涌天, 常 军, 等. 轻型大视场自由曲面棱镜头盔显示器的设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 309-311.
- 5 Lu Haiping, Liu Weiqi, Kang Yusi, *et al.* Design of compact optical system in panoramic three-dimensional head mounted display[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0522002.
- 卢海平, 刘伟奇, 康玉思, 等. 全景三维立体头盔显示光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0522002.
- 6 Lü Xiangbo, Wang Zhen, Wei Zhangfan, *et al.* Lightweight design of a helmet-mounted display optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1022007.
- 吕向博, 王 振, 魏张帆, 等. 轻量化头戴显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1022007.
- 7 Zeng Fei, Zhang Xin. Waveguide holographic head-mounted display technology[J]. Chinese Optics, 2014, 7(5): 731-738.
- 曾 飞, 张 新. 全息波导头盔显示技术[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 731-738.
- 8 Tong Jingbo, Cui Qingfeng, Xue Changxi, *et al.* Optical design of an off-axis dual-channel helmet mounted display[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2662-2667.
- 佟静波, 崔庆丰, 薛常喜, 等. 离轴双通道头盔显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2662-2667.
- 9 Mei Chao, Zhou Sizhong, Zhang Hengjin, *et al.* Method of first-order ghost-image analysis in imaging system based on Code V and Tracepro[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0411003.
- 梅 超, 周泗忠, 张恒金, 等. 基于 Code V 和 Tracepro 的成像光学系统一阶杂光分析方法[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0411003.
- 10 Yang Yongliang, Fu Xiuhua, Liu Guojun, *et al.* Study and fabrication of multi-wavelength laser antireflection film using new mixed material[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1007002.
- 杨永亮, 付秀华, 刘国军, 等. 采用新型混合材料的多波长激光减反射膜的研制[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1007002.
- 11 Fan Huanhuan, Zhang Yueguang, Shen Weidong, *et al.* Optical properties of Ta₂O₅ thin films fabricated by atomic layer deposition[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1031001.
- 范欢欢, 章岳光, 沈伟东, 等. 原子层沉积制备 Ta₂O₅ 薄膜的光学特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1031001.
- 12 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.* Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 238-239.
- 唐晋发, 顾培夫, 刘 旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 238-239.
- 13 Gao Xiaodan. Design and manufacture of non-polarizing light-splitting film with 7 to 3 in a wide spectral range[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(5): 1302-1305.
- 高晓丹. 宽波段 7:3 消偏振分光膜的设计及镀制[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1302-1305.
- 14 Fu Xiuhua, Mo Zhaoyan, Huang Jinlong, *et al.* Design and fabrication of polarizing beam splitter in adaptive optics laser guide star system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0131002.
- 付秀华, 莫朝燕, 黄金龙, 等. 自适应光学激光导星系统中偏振分光膜的研制[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0131002.
- 15 Fu Xiuhua, Zhang Yushuai, Kou Yang, *et al.* Study and fabrication of multi-channel filter film in free-space laser communication system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0407001.
- 付秀华, 张于帅, 寇 洋, 等. 自由空间激光通信系统中多通道滤光膜的研制[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0407001.
- 16 Fu Xiuhua, Kou Yang, Liu Dongmei, *et al.* Research of ultraviolet filter film in solar blind communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0731001.
- 付秀华, 寇 洋, 刘冬梅, 等. 紫外日盲通信系统中滤光膜的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0731001.